

*Dans le sillage de Maurice Gariel...*

## Les étapes de la régulation des turbines

### Steps in turbine governor development

PAR L'ABBÉ CAYÈRE

INGÉNIEUR A.M. ET I.E.G.

DIRECTEUR DE L'ÉCOLE LIBRE D'APPRENTISSAGE, GRENOBLE

*Brève revue des problèmes successifs de la régulation. Cycles de Léauté. — Premiers stabilisateurs. — Triomphe de l'asservissement amortisseur. — Ce sauveur est gênant, il faut l'annuler par la compensation, mais en le tenant toujours prêt à intervenir. — Il intervient, de fâcheuse manière, dans les prises de charge, qu'il rend lentes et réticentes. — Lutte contre l'asservissement : les régulateurs tachy-accélérométriques. — Les exigences de précision du réseau moderne conduisent à sortir de la chaîne de réglage l'accéléromètre, très imprécis, et à l'utiliser, en accéléroscope, sur un mécanisme veto-stabilisateur. — Une énigme actuelle : le réglage secondaire « par la phase » est un réglage chronométrique, en principe très instable. Sa stabilité vient probablement des régulateurs primaires.*

*A brief review of successive governing problems. Léauté cycles.—The first stabilizers.—The success of damped feedback.—This is a troublesome remedy, however, as it both needs compensation and is always required to be available for immediate action.—It results in delays and sluggishness when loads are being taken on.—Speed and acceleration-sensitive governors as a means of overcoming feedback effects.—The accuracy of modern networks is such that the accelerometer, a most inaccurate instrument, has had to be taken out of the governing sequence and used instead as an accelerometer on a veto-stabilizing mechanism.—The surprising stability of present-day secondary "phasewise" governing, which should really be very unstable, as it depends on time, is something of an enigma. A possible explanation is that its stability may be due to the primary governors.*

J'ai accepté volontiers de parler des travaux de Maurice GARIEL sur les Régulateurs de vitesse : c'est pour moi un devoir de reconnaissance personnelle, car je lui dois beaucoup à tous points de vue. C'est aussi un devoir envers le Bien Commun de l'Hydraulique, car il me semble

utile de résumer pour les générations futures les idées des pionniers de la Régulation, elles sont encore fécondes.

Je voudrais faire avec vous un survol rapide de ce problème des Régulateurs pour en discerner les lignes essentielles.

#### I. — LA PROTO-HISTOIRE DE LA RÉGULATION

Il y a d'abord, évidemment, Watt et son tachymètre (vers 1800). Puis ce *régulateur direct*, suffisant pour les machines à vapeur de l'époque, se trouva trop faible pour actionner le vannage des

roues hydrauliques. De nombreux inventeurs essayèrent le *régulateur indirect* dans lequel le tachymètre n'a plus que la besogne, peu fatigante, *d'embrayer la fermeture du vannage quand la*

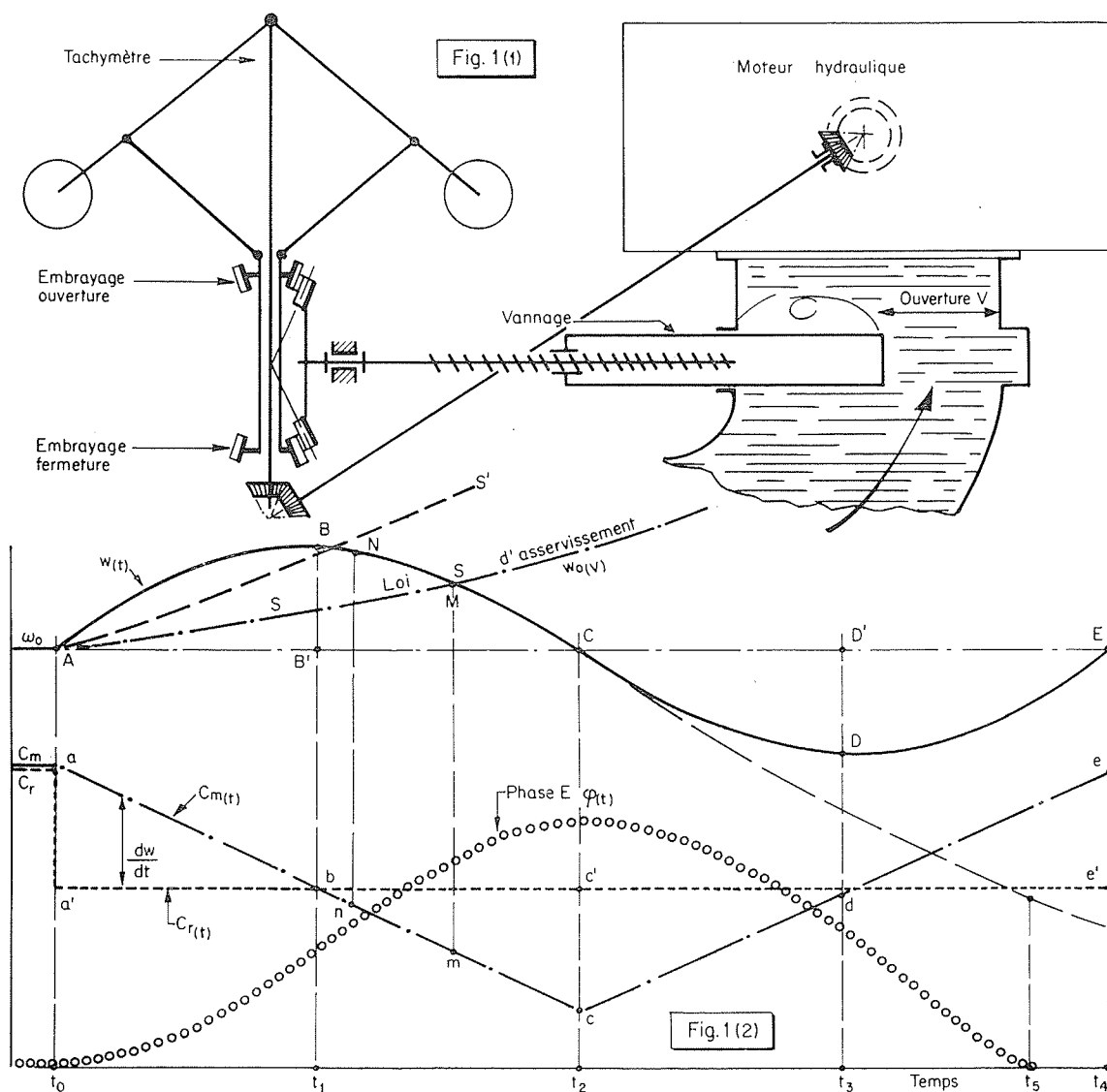


FIG. 1

vitesse est trop grande, et l'ouverture quand la vitesse est trop petite, figure 1 (1).

C'était si simple et si clair que le succès semblait évident. En fait, ce fut une longue suite de déboires exposés en 1885 par Léauté dans son célèbre mémoire sur « les oscillations à longue période ».

La figure 1 (2) montre comment et pourquoi ces oscillations se produisent : à l'instant  $t_0$ , le couple résistant  $C_r$  baisse brusquement, créant une accélération proportionnelle à  $C_m - C_r$ . La vitesse augmente, le tachymètre embraye aussitôt la fermeture du vannage. En  $t_1$ , les couples  $C_m$  et  $C_r$  sont devenus égaux, l'accélération est nulle, la vitesse passe par un maximum en B.

Cette égalité des couples, moteur et résistant, devrait inciter à arrêter la fermeture du van-

nage. Mais comme le tachymètre ne connaît que la vitesse, qui est très grande en B, il continue à demander la manœuvre de fermeture et ne l'arrête qu'en  $t_2$ , quand la vitesse est revenue à la valeur de consigne  $W_0$ .

Mais on est allé deux fois trop loin, le couple moteur est devenu trop petit, la vitesse baisse rapidement, le tachymètre embraye l'ouverture du vannage; il maintient cet ordre d'ouverture au temps  $t_3$  (où les couples sont égaux), et il ne stoppe la manœuvre d'ouverture qu'à l'instant  $t_4$ , où la vitesse est revenue à la valeur de consigne  $W_0$ .

Mais le couple moteur a retrouvé sa valeur initiale au temps  $t_0$  et le même cycle de manœuvres maladroites va se reproduire indéfiniment.

Voilà le mécanisme de ce que nous appelions

autrefois les *Cycles de Léauté*, et les pionniers que j'ai connus — Barbillion, G. Routin, Gariel — attachaient une grande importance à cette notion de base, trop souvent oubliée dans les bibliographies.

Le fond de ce phénomène de « pompage » est que le régulateur de vitesse doit être, en même temps, un *égalisateur des couples*. Or, ce double

programme enferme une contradiction, car *écart de couple et écart de vitesse ont une tendance naturelle irrésistible à être en quadrature*.

La maladie de la Régulation, très bien diagnostiquée par Léauté, est donc grave, et enracinée dans la nature des choses. Reste à trouver le remède.

## II. — LE RÈGNE DE L'ASSERVISSEMENT

a) Léauté proposait un moyen héroïque : il laissait se produire un pompage, un demi-cycle au moins, où le vannage allait deux fois trop loin. Il mesurait la course parcourue et savait qu'il faudrait arrêter la manœuvre à mi-course. Mais la réalisation pratique de ce principe fut impossible.

b) Marcel Desprez proposait une autre solution : le tachymètre actionnait un contact électrique qui poussait devant lui le plot de contact et le lâchait dès que l'écart de vitesse diminuait, peu après le point B, figure 1 (2), ce qui stoppait la manœuvre du vannage juste au moment de l'égalité des couples. L'idée était excellente, mais il restait à ramener la vitesse à sa valeur de consigne.

c) Un hydraulicien genevois, Piccard, essaya, en 1885, un régulateur à *servo-moteur hydraulique*, utilisant l'asservissement, inventé par Farcot en 1868, pour commander un vannage à grande course et grands efforts par un tachymètre à petite course et petits efforts.

Il me semble probable que Piccard n'a eu en vue qu'un *amplificateur de course et d'effort*, suivant le concept même de Farcot, et qu'ils n'ont vu ni l'un ni l'autre, pas plus que Marcel Desprez et Léauté, que *l'asservissement de Farcot est non seulement un amplificateur de course et d'effort, mais aussi un stabilisateur remarquable des cycles de Léauté*.

d) Je crois personnellement, mais ma documentation est fragmentaire, que Barbillion et Routin furent les premiers, vers 1910, à exposer méthodiquement le *rôle stabilisateur de l'asservissement*. Maurice GARIEL, qui fut, vers cette époque, collaborateur de G. Routin chez Neyret-Beylier, se trouva donc à la source des *théories de l'asservissement amortisseur d'oscillations* qui devaient connaître tant de développements avec les servo-mécanismes.

Si on voulait résumer en quelques mots, entreprise téméraires, ces savantes théories, il me semble qu'il faudrait dire, en gros : *l'asservisse-*

*ment est d'abord un amplificateur d'effort et de course qui lie le vannage au tachymètre* suivant la conception de Farcot; *le vannage est asservi au manchon du tachymètre*.

Mais, par un processus analogue au principe de l'action et de la réaction, le vannage réagit sur le tachymètre et son embrayeur, lui imposant une vitesse d'équilibre plus grande à vide qu'en charge. Dans ce second aspect de l'asservissement, *c'est le tachymètre qui se trouve asservi au vannage*.

Cet asservissement rétro-actif, ou feed-back, ou Rückführung, a des qualités stabilisatrices remarquables que son père, Farcot, n'a peut-être pas entrevues, que Marcel Desprez et Léauté n'ont pas songé à utiliser, et dont Piccard a bénéficié par hasard : cherchant seulement un *amplificateur d'effort*, il a obtenu par surcroît un *stabilisateur du pompage*.

L'explication est facile à suivre sur la figure 1 (2). Quand le vannage se ferme, il augmente la vitesse d'équilibre  $W_0$  de l'embrayeur du tachymètre suivant une courbe S, loi d'asservissement, qui lie  $W_0$  à l'ouverture V du vannage.

*L'arrêt de la manœuvre d'ouverture est ainsi avancé de C en M et les cycles de Léauté sont rendus convergents*.

Si même on réalise un asservissement très énergique, courbe S', l'arrêt du vannage a lieu en B, à l'instant T, où les couples sont égaux, les cycles de Léauté sont alors tellement amortis qu'ils sont supprimés.

L'asservissement est donc le *remède-miracle*; il a eu tant de succès qu'on a donné son nom (cependant peu démocratique) à l'immense famille des *servo-mécanismes*.

e) Mais, comme pour les antibiotiques, et autres drogues-miracles, quand l'asservissement a guéri la grave maladie des oscillations de pompage, il reste ensuite à se guérir de la drogue-miracle.

Dans nos régulateurs, l'asservissement est un

sauveur précieux, mais encombrant : il amortit les oscillations de Léauté, mais c'est en dérégulant la vitesse d'équilibre, qui se trouve ainsi stabilisée très loin de la vitesse de consigne.

Il faut donc se débarrasser au plus vite de ce serviteur à la fois indispensable et indésirable; et les techniciens de la régulation, j'en rougis de honte, ont traité l'asservissement avec un machiavélisme diabolique. On le fait disparaître par le *mécanisme de la compensation*, mais on le déclare toujours mobilisable : à la moindre perturbation, il doit être prêt à intervenir instantanément avec toute sa vigueur. Puis, la stabilisation des cycles de Léauté obtenue, il doit disparaître sans laisser de traces. Avouons qu'il lui faut un bon caractère, ... et une forte dose d'humilité.

f) *Cet asservissement stabilisateur est donc essentiellement provisoire; on dit aujourd'hui : Statisme provisoire, ce qui laisse deviner qu'il y a aussi un Statisme permanent. Celui-ci ne vise plus à l'amortissement des oscillations de Léauté, mais à la stabilité de la répartition des charges entre groupes couplés en parallèle sur le réseau.*

### III. — EFFORTS POUR SE LIBÉRER DE L'ASSERVISSEMENT. — RÉGULATEURS TACHY-ACCÉLÉROMÉTRIQUES

L'asservissement apparaît facilement au profane comme donnant un réglage de haute perfection.

Pourtant, depuis plus de quarante ans, de nombreux chercheurs ont dépensé des prodiges d'ingéniosité et de patience pour le supprimer en réalisant des *régulateurs tachy-accélérométriques sans asservissement stabilisateur*.

Pourquoi cette recherche? Parce que l'asservissement, si perfectionné soit-il, garde un vice originel : c'est un *mécanisme d'opposition*, qui agit *contre le tachymètre*, pour étouffer les cycles de Léauté. Il remplit bien ce rôle, mais dans les périodes de prise de charge sur le réseau, *il freine la prise de charge de son groupe*.

Sans doute, la compensation détruit l'asservissement à mesure qu'il naît, mais elle ne le détruit que partiellement, lentement; sinon elle supprimerait son action stabilisatrice.

Si un incident de ligne coupe brusquement 500 000 kW venant des usines des Alpes, les turbines du Centre, si elles ont un asservissement, ne les remplaceront que lentement, à mesure que la compensation détruira l'asservissement. Elles n'apporteront toute leur puissance qu'après 20 ou 30 secondes, *après la bataille*, et les groupes thermiques auront dû apporter leur secours en 3 ou

Les régulateurs de turbines ont donc, depuis 1910, *deux asservissements ou statismes*. Le premier, *temporaire*, est très grand, dérégulant la vitesse de 20 % à 40 %, et davantage, entre pleine charge et marche à vide; son rôle est la *stabilisation* rapide des cycles de Léauté, après quoi on l'anéantit par la compensation.

Le *statisme permanent*, bien plus faible, réglable de 0 à 6 %, n'a qu'un faible rôle stabilisateur du pompage; il a pour rôle essentiel la *répartition* des variations de charge entre les divers groupes du réseau.

Un régulateur à 6 % de statisme permanent sera très peu ému par les baisses de fréquence du réseau (qui sont des appels au secours). Pour une baisse de fréquence de 0,6 %, il n'apportera que 10 % de sa puissance nominale.

Au contraire, un groupe n'ayant que 0,6 % de statisme passera de la marche à vide à la pleine charge pour cette baisse de fréquence de 0,6 % : ce sera un groupe de réglage, le premier un groupe à puissance constante.

4 secondes, au grand dommage peut-être de leurs chaudières et de leurs turbines, soumises à de brusques et dangereux changements de température.

L'asservissement n'est donc nullement la solution presque parfaite qu'on supposerait d'après la littérature des servo-mécanismes. C'est un *stabilisateur efficace*, mais il traîne derrière lui des *inconvenients fort indésirables* : lenteur paresseuse des prises de charge.

Il a donc semblé souhaitable, à beaucoup de spécialistes de la régulation, de trouver un autre stabilisateur, moins gênant que l'asservissement. L'accéléromètre promettait des solutions séduisantes, car il a *le sens de l'écart des couples*. En l'associant avec le tachymètre, qui n'a que le sens de la vitesse, on aurait une *combinaison de l'aveugle et du paralytique* qui serait sans doute avantageuse.

Ces idées étaient dans l'air, au temps où j'étais élève de Barbillion et de Routin; si bien que, pendant la guerre de 1914-1918, étant mécanicien dans la Marine, elles germèrent dans mon esprit, et je pris un brevet de tachy-accéléromètre avec dosage réglable, par le vannage, de l'influence relative de l'écart de vitesse et de l'accélération.

La guerre terminée, je vins le proposer à Mau-

rice GABRIEL, qui me fit un accueil chaleureux, dont j'admire rétrospectivement la générosité et l'imprudence. Car je devais poursuivre cinq ans l'accéléromètre sensible, précis... et stable dont j'avais besoin pour réaliser mon principe de dosage variable avec la charge. Je n'y suis pas arrivé.

J'ai réalisé seulement un tachy-accéléromètre hydraulique à dosage constant, comportant une pompe centrifuge à canaux en spirales, dont la pression d'huile, mesurée par une cloche-manométrique à frottements luvoyants, donnait l'ordre de réglage  $A(w - w_0) + B dw/dt$ .

Cet appareil, essayé en 1926 à Belleville (Savoie), se montra d'une sensibilité et d'une stabilité remarquables, avec le statisme temporaire supprimé et le statisme permanent réduit à 0,5 %. On voyait, sur le vannage de la turbine, démarrer les locomotives électriques de la ligne de Modane, et la turbine ouvrait par coups successifs, correspondant aux sauts des résistances de démarrage.

Malheureusement, ce tachy-accéléromètre hydraulique chauffait à 30 ou 40 degrés au-dessus de l'ambiance, ce qui dérégla progressivement sa vitesse de régime. Il ne fut donc pas retenu. Mais le prototype, oublié à Belleville, y fonctionna pendant trente ans sans incident, bel exemple de fidélité.

Vers la même époque, les Ateliers des Charmilles réalisèrent un remarquable tachy-accéléromètre mécanique à dosage constant auquel ils restent fidèles.

Enfin, plus tard, la firme italienne Riva réalisa un tachy-accéléromètre à dash-pot, essayé déjà en 1924 chez Neyrpic, sans arriver, faute de temps, à surmonter les difficultés de mise au point.

Je n'insiste pas sur ces régulateurs tachy-accélérométriques, je retiens seulement que trois constructeurs de grande classe ont travaillé avec acharnement pour en réaliser un, afin de supprimer l'asservissement et ses inconvénients.

#### IV. — UN NOUVEAU MODE DE STABILISATION DES RÉGULATEURS : LE VETO ACCÉLÉROSCOPIQUE

La figure 2 (1), résumant le schéma de tous les régulateurs tachy-accélérométriques, montre, du point de vue métrologique, un grave défaut : *l'imprécision totale est la somme des imprécisions du tachymètre et de l'accéléromètre.*

L'imprécision des tachymètres modernes est faible :  $10^{-4}$  (1 centième de %); mais celle des accéléromètres doit être dix fois plus grande au moins.

Si bien qu'en introduisant l'accéléromètre pour supprimer l'asservissement avec ses prises de charge lentes et réticentes, on a plus que décuplé l'imprécision de la chaîne de réglage.

Les prises de charge sont devenues alertes et rapides, mais dix fois plus imprécises, ce qui me paraît grave sur le réseau national.

La figure 2 (2) montre qu'un régulateur parfaitement précis, réglé à 0,5 % de statisme, en face d'un « appel au secours du réseau » qui traduit sa surcharge brusque par une baisse de fréquence de 0,2 %, répond en apportant 40 % de sa puissance maximale.

La figure 2 (3) montre que l'imprécision du tachymètre :  $\pm 0,01$  % de la fréquence, soit  $1/20^\circ$  de l'appel au secours, produira une imprécision de  $\pm 1/20^\circ$  de la réponse du groupe, qui se pla-

cera, au hasard, entre 38 % et 42 % de  $P_{max}$ , ce qui est très bien encore.

La figure 2 (4) montre que si on ajoute un accéléromètre dont l'imprécision E est vingt fois l'imprécision e du tachymètre, il en résultera une imprécision de charge de  $\pm 40$  %, si bien que le groupe prendra, au hasard, une charge comprise entre la marche à vide et les 80/100<sup>es</sup> de la puissance maximale, ce qui est très peu satisfaisant.

Cela m'explique que j'aie vu à Chastang, qui pourrait apporter toute sa puissance en 4 ou 5 secondes, les groupes marcher avec un statisme de 5 % (alors que j'attendais 0,5 % d'après les idées anciennes), et cela aussi bien sur les régulateurs tachy-accélérométriques que sur le régulateur électronique ultra-moderne.

Quand j'ai exprimé une surprise devant un statisme aussi élevé pour une usine de réglage, on m'a répondu qu'il était nécessaire par l'imprécision des régulateurs.

J'arrive donc à conclure que la précision du régulateur, ou, si l'on préfère, la finesse de sa caractéristique de statisme S, figures 2 (2) (3) (4), prend une importance considérable avec le réseau unique national, où les échanges de charge doi-

vent n'entraîner que des variations infimes de la fréquence.

Dès lors, l'association tachymètre-accéléromètre, dont j'étais partisan il y a quarante ans, me paraît aujourd'hui condamnée, à cause de l'imprécision de l'accéléromètre (et l'accéléromètre électronique ne sera pas sans doute plus précis que le mécanique).

L'ordre de réglage  $A(w - w_0) + B dw/dt$  se trouve ainsi condamné à la médiocrité, et l'idée m'est venue (fig. 3) de sortir l'accéléromètre de la chaîne de réglage et d'utiliser quand même ses qualités stabilisatrices en lui donnant seulement un rôle de veto : quand la vitesse augmente, il interdit la manœuvre d'ouverture du vannage, quand la vitesse diminue, il interdit la fermeture.

Ainsi, dans la figure 1, le veto accélérométrique stoppe la fermeture du vannage en N, peu après l'égalité des couples, ce qui tue dans l'œuf les cycles de Léauté. De plus, la vitesse est légèrement décroissante, elle revient donc d'elle-même vers la vitesse de consigne.

Le réglage de la charge est assuré, avec le maximum de précision, par le seul tachymètre, l'imprécision de l'accéléromètre ne perturbe pas la distribution des charges. On n'a même pas besoin d'une mesure précise de l'accélération, il suffit d'avoir un accéléroscope auquel on demande d'indiquer le changement de signe de l'accélération et non sa valeur, ce qui simplifie beaucoup le problème.

La figure 3 montre un des nombreux modes de réalisation du veto accéléroscopique.

Aussitôt que ces idées très simples eurent traversé ma tête, je pris un brevet pour prendre date, et je le portai à Maurice GARIEL qui reçut cet enfant de ma vieillesse avec autant d'ouverture d'esprit et de générosité qu'il avait accueilli, quarante ans plus tôt, mon tachy-accéléromètre à dosage. Il avait compris, du premier coup, le double avantage recherché par cette idée nouvelle et je le revois expliquant cela à ses ingénieurs spécialistes, le dernier jour où je le vis : d'abord supprimer la réticence, la lenteur, le retard des prises de charge causés par l'asservissement; ensuite, sortir l'accéléromètre de la chaîne de me-

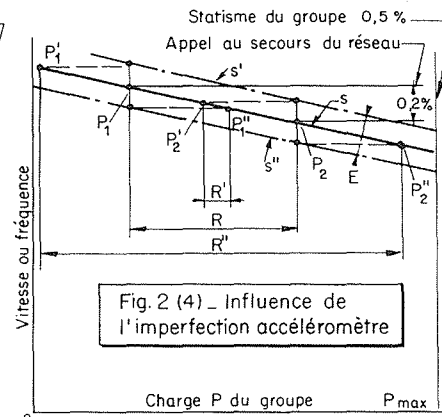
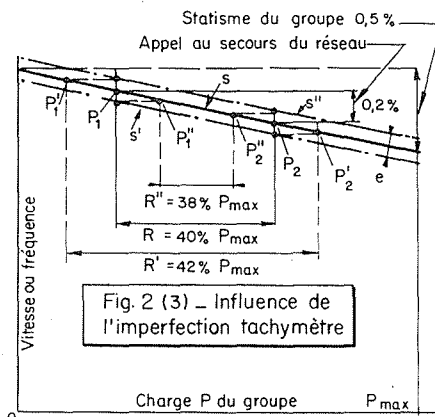
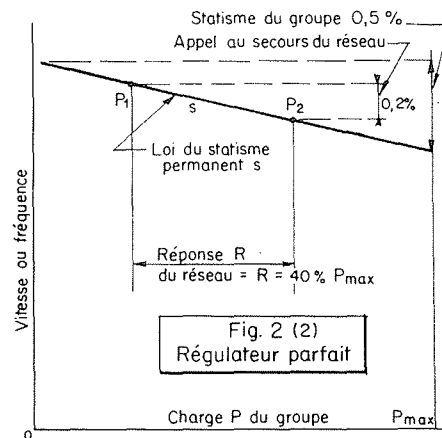
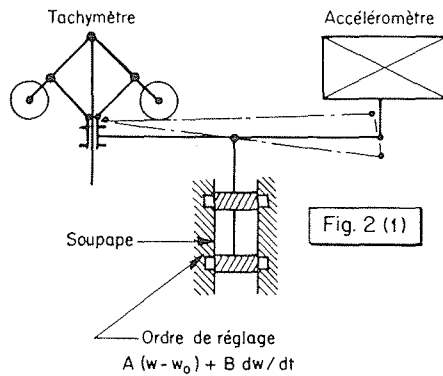


FIG. 2

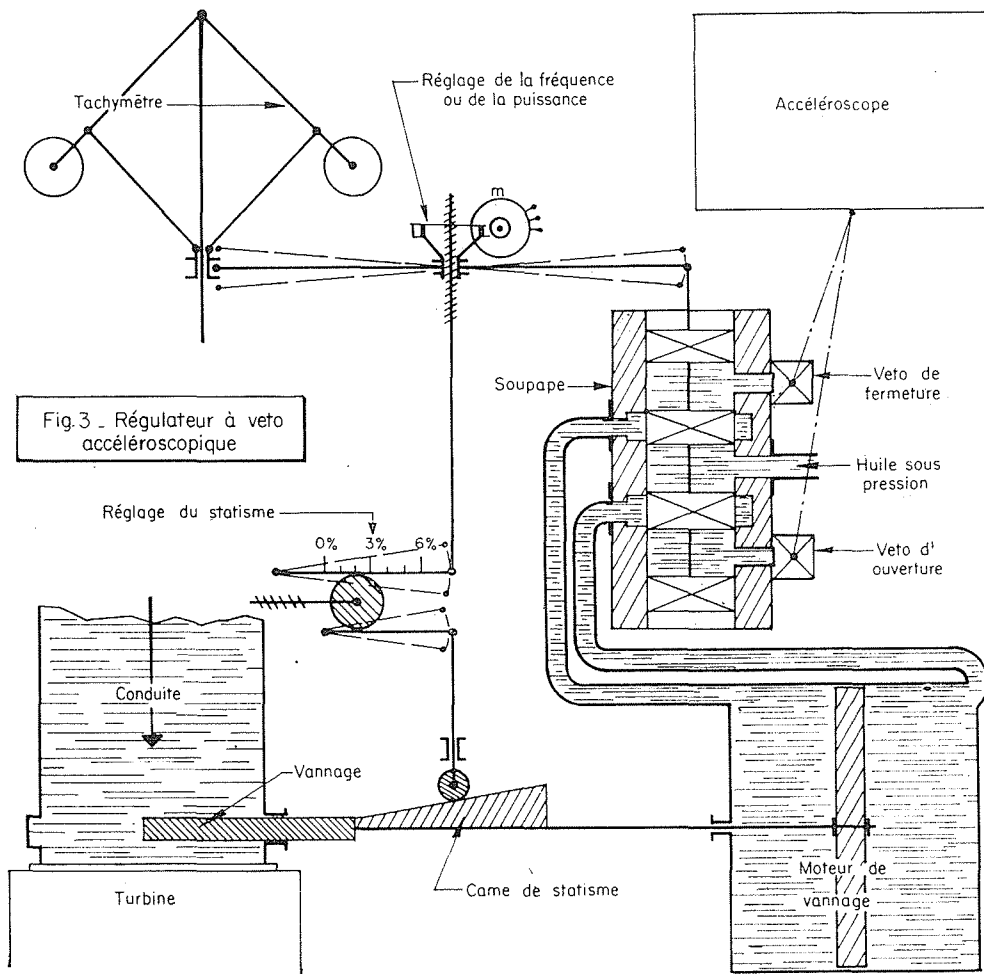


Fig. 3

sure où il apporte une grande imprécision dans les prises de charge, le réduire à un accéléroscopie stabilisant par veto les oscillations de Léauté, sans apporter de retard ou d'imprécision dans la répartition des charges.

J'admire encore, rétrospectivement, cette jeu-

nesse d'esprit de notre ami regretté, qui allait à l'essentiel, aimait à se l'expliquer par des idées claires et simples, extrayant des théories et des expériences la « substantifique moelle » qu'il aurait à retenir et à utiliser pour son rude métier de Chef.

## V. — LE RÉGLAGE SECONDAIRE

Lorsque j'ai quitté Neyrpic pour entrer au Séminaire, il y a trente-cinq ans, les réseaux étaient petits, isolés, et les prises de charge se faisaient automatiquement par la baisse de fréquence qui résultait de l'augmentation de la charge totale du réseau.

Cette baisse de fréquence était un « appel au secours » du réseau, auquel chaque groupe répondait suivant l'ampleur fixée par son *statisme permanent* et l'*agilité* permise par la *compensation plus ou moins rapide de son statisme temporaire*.

Ramené aux problèmes de régulation par mon *veto accéléroscopique*, je retrouve bien des choses anciennes et, aussi, bien des choses nouvelles. On n'accepte plus que le réseau ralentisse quand il est chargé (c'était pourtant bien commode), et un poste central, par *télécommande*, ramène la fréquence du réseau unique, national et même international, à sa valeur de consigne, avec une grande précision.

Il y a donc un *réglage secondaire, centralisé*, qui vient se superposer au *réglage primaire des régulateurs de turbines*. Le souci de la précision du réglage va même plus loin que la recherche d'une fréquence constante : on cherche, actuellement, à réaliser *la marche à phase constante* ou tout au moins ramenée chaque jour à une valeur nulle, comme on remet une pendule à l'heure. En fait, il s'agit bien de remettre à l'heure exacte les pendules électriques synchrones actionnées par le réseau.

Cette *phase* est le décalage angulaire entre :

d'une part, le *vecteur tension du réseau*, ou un *moteur synchrone* couplé sur lui, et, d'autre part, un *moteur étalon de fréquence* synchronisé à une horloge électronique à quartz vibrant dont l'imprécision est à peine  $10^{-6}$ .

Je n'ai pas l'intention de résumer les vastes et difficiles problèmes du réglage secondaire, que je connais d'ailleurs très mal. Je voudrais seulement en esquisser un, celui du *régulateur chronométrique*, qui nous gouverne tous quand l'E.D.F. marche à phase constante.

La figure 4 montre comment je me représente le schéma de ce réglage complexe, dans lequel nous vivons tous actuellement. Le moteur H, synchronisé avec l'horloge-étalon, est comparé à chaque instant au moteur synchrone R du réseau, par un train planétaire conique dont le bras B se décale de l'angle  $\varphi$  appelé phase.

Cette phase, indiquée par le bras B, vient agir, à travers un ensemble d'organes M, sur la soupape de distribution S des moteurs de vannage

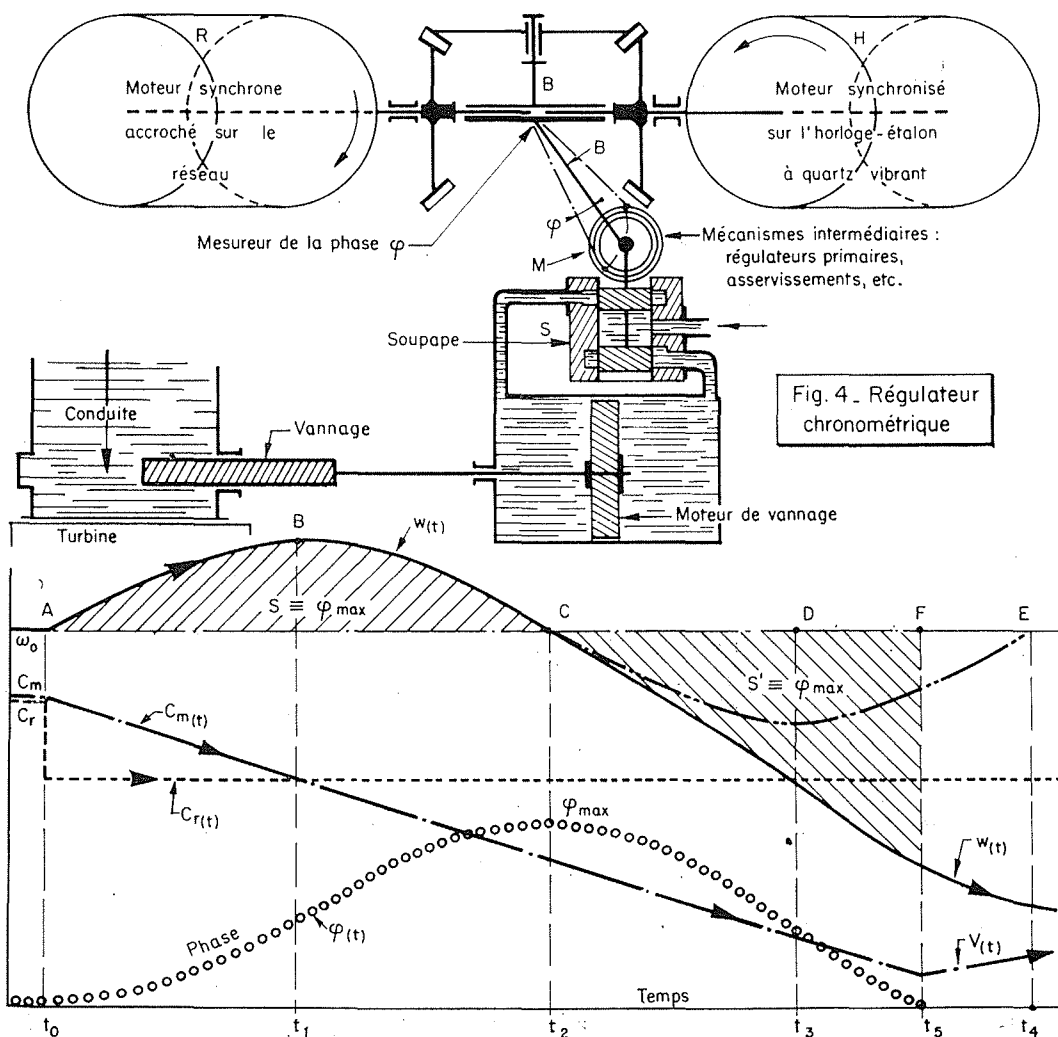


Fig. 4. Régulateur chronométrique

FIG. 4

des turbines. Quand le réseau prend de l'avance, la phase  $\varphi$  est positive et elle commande la fermeture du vannage pour ralentir le réseau et le mettre au pas sur l'horloge-étalon.

Ce régulateur chronométrique m'a été déjà enseigné vers 1910 par mon Maître Barbillion, d'ailleurs comme une curiosité intellectuelle sans intérêt pratique.

C'est qu'en effet le système de la figure 4 est d'une *instabilité remarquable*. Reproduisons le graphique de la figure 1 (2), en y ajoutant la phase  $\varphi$  dont la courbe monte d'abord lentement en  $t_0$ , puis rapidement en  $t_1$ , quand  $w$  est maximum. En  $t_2$ , la vitesse est revenue à la valeur de consigne, le *vannage est allé déjà deux fois trop loin*; et la phase, atteignant son maximum, continue à commander la fermeture du vannage.

Cette manœuvre ne sera stoppée qu'en  $t_3$ , quand la phase sera revenue à zéro, quand la surface S' de baisse de phase égalera la surface S d'augmentation de la phase. Le vannage sera allé trois ou quatre fois trop loin.

Dans le régulateur tachymétrique (fig. 1), le

vannage allait seulement deux fois trop loin, et cela entraînait les désastreux cycles de Léauté. Le régulateur chronométrique de la figure 4, qui va trois ou quatre fois trop loin, devrait entraîner des *supercycles de Léauté, d'une divergence catastrophique...*

Et pourtant, ça marche, comme disait à peu près Galilée, mais on a quelque peine à voir pourquoi et comment. Pour moi, devenu profane en la matière, je me contente de dire que la stabilité providentiellement réalisée par ce réglage secondaire à phase constante (donc chronométrique), est probablement assurée par les organes stabilisateurs des régulateurs primaires des turbines. Le cercle M, par lequel j'ai figuré tous les organes entre la phase et le tiroir du moteur de vannage, enferme donc un mystère stabilisateur.

J'admire fort les ingénieurs de l'E.D.F. qui ont eu l'audace d'utiliser le régulateur chronométrique et sont arrivés à se garder de son hyperinstabilité naturelle. Je crois que ce résultat heureux vaut une étude approfondie : *réglage primaire et réglage secondaire forment un tout qui mériterait une théorie d'ensemble.*

## VI. — CONCLUSIONS

Je me garderai de prophétiser sur les étapes futures de la régulation.

Le régulateur électronique supplantera-t-il bientôt le régulateur mécanique? C'est une question de précision, de finesse de la caractéristique S de statisme des figures 2 (2) (3) (4). Le tachymètre mécanique est à  $10^{-4}$  d'imprécision; en le perfectionnant, on peut espérer atteindre  $10^{-5}$ . L'expérience seule montrera si le tachymètre électronique atteindra cette performance. Sans doute il y mettra quelque temps, quelques années.

Verra-t-on un jour un tachymètre unique, de haute précision, commander par télé-réglage les vannages de toutes les turbines de France? Ce n'est pas impossible, c'est même séduisant, mais la stabilisation des cycles de Léauté sera difficile, surtout si on veut régler à phase constante ce

qui retombe dans le régulateur chronométrique simple, si instable.

\*\*

Je crois, Messieurs, vous avoir dit en substance ce que vous aurait dit Maurice GABRIEL. Il vous l'aurait dit bien mieux que moi, mais je crois avoir été fidèle à sa pensée sur ces problèmes de régulation. C'est par eux que je suis entré en relation avec lui, il y a quarante et un ans, et ce fut pour moi une grande grâce. C'est d'eux encore que nous avons parlé la dernière fois que je l'ai vu, deux mois avant sa mort.

Je crois qu'il est utile de résumer la pensée des anciens, leur point d'aboutissement, car c'est aussi le point de départ des jeunes.

C'est un peu comme le flambeau olympique que nous leur transmettons pour qu'ils le portent plus avant.